

# 小鼠心肌 MHC 和 TM1 基因表达的运动训练实验研究

刘璐, 刘祥梅, 谭军, 施孟

(湖南师范大学体育学院, 湖南长沙 410012)

**摘要:** 从对心肌 MHC 和 TM1 基因表达的影响, 探讨韭楂泥鳅汤提高小鼠运动能力的作用及机制。将健康雄性 ICR 小鼠 32 只, 按体重分层随机分为安静对照组(C)、运动训练组(T)、泥鳅运动组 1(N1)、泥鳅运动组 2(N2), 每组 8 只。T 组和 N 组游泳训练三周后, 尾根部负重 5% 进行力竭游泳, 记录游泳至力竭时间。24 h 后取材, 检测心系数, HE 染色观察心肌组织结构, RT-PCR 测定心肌组织  $\alpha$ -MHC、 $\beta$ -MHC 和 TM1 的基因表达。表明: 与 T 组比较, 小鼠的力竭运动时间 N1 组显著延长( $P < 0.05$ ), N2 组呈延长趋势但无显著性差异( $P > 0.05$ )。与 C 组比较, T 组小鼠的心系数显著增高( $P < 0.05$ ), N1 组呈增高趋势而无显著性差异( $P > 0.05$ ); 光镜下, C 组心肌细胞界限清晰、结构正常; 力竭后 24 h, T 组的心肌细胞界限模糊, 可见心肌纤维断裂和间质水肿, 而 N1 组接近 C 组; 与 C 组比较, T 组的  $\beta$ -MHC mRNA 表达显著增高( $P < 0.05$ ),  $\alpha/\beta$ -MHC mRNA 比值显著降低( $P < 0.05$ ); N1 组的  $\alpha$ -MHC mRNA、 $\beta$ -MHC mRNA 和 TM1 mRNA 表达较 C 组和 T 组均增高( $P < 0.05$ ), 但  $\alpha/\beta$ -MHC mRNA 比值与 C 组差异不显著( $P > 0.05$ )。合适应用韭楂泥鳅汤能延长小鼠力竭游泳时间, 具有抗运动疲劳作用, 与其稳定肌球蛋白重链基因表达比和增强原肌球蛋白 1 基因的表达相关。

**关键词:** 韭楂泥鳅; 力竭运动; 心肌; MHC 基因; TM1 基因

中图分类号: G804.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-7413(2015)06-0047-06

## The Leek Hawthorn Loach Soup Effect on Swimming Training and Exhaustion Mice Myocardial MHC and TM1 Gene Expression

LIU Lu, LIU Xiang-mei, TAN Jun, SHI Meng

(College of Physical Education Science, Hunan Normal University, Changsha 410012, China)

**Abstract:** (Objective) By analyzing influences on myocardial MHC and TM1 gene expression, the experiment has discussed the function and mechanism of the leek hawthorn loach soup that improves mice's movement capacity. (Methods) 32 healthy male ICR mice are randomly divided into sedentary control group (C), exercise-trained group (T), Loach movement group 1 (N1) and Loach movement group 2 (N2) ( $n = 8$  animals/group) on the basis of weight. After three weeks of swim training on group T and group N, these mice start to swim exhaustively with the tail root 5 percent weight. The exhaustive swimming time was record. After 24 hours, coefficient of the heart was detected, cardiac muscle tissue structure was observed by microscope after HE staining, Expressions of myocardial  $\alpha$ -MHC and  $\beta$ -MHC mRNA were detected by RT-PCR. (Results) 1. N1 group was significantly longer than T group ( $P < 0.05$ ) on the time of exercise exhaustive. Compared with C group heart coefficient increased significantly ( $P < 0.05$ ) in T group mice. 2. The myocardial cell of C group was clear and normal structure; myocardial cell was fuzzy, visible myocardial fiber fracture and interstitial edema in T group; while N1 group is close to C group. 3. Compared with group C  $\beta$ -MHC mRNA expression is significantly higher ( $P < 0.05$ ),  $\alpha/\beta$  MHC mRNA decreases significantly ( $P < 0.05$ ) in T group; N1 group of  $\alpha$ -MHC mRNA,  $\beta$ -MHC mRNA and TM1 mRNA expression are higher than C group and T group ( $P < 0.05$ ), but the  $\alpha/\beta$ -MHC mRNA expression has no significant difference with C group ( $P > 0.05$ ). (Conclusion) The leek hawthorn loach soup can prolong exhaustive exercise time of mice by enhancing the resistance fatigue ability. This is related to protect the myocardial cell, stable proportion of myosin heavy chain gene expression and enhance TM1 gene expression.

**Key words:** leek hawthorn loach soup; exhaustion exercise; myocardium; MHC mRNA; TM1 mRNA

运动训练机体常常产生疲劳,运用合理的营养手段抵抗疲劳、提高运动能力并研究其作用机制具有重要的运动营养学意义。韭菜子具有温肾助阳和固精等功效<sup>[1]</sup>。山楂是我国特有的栽培果树,山楂果实含有丰富的对人体有益成分,其中 Vitamin C 含量最为突出,铁、钙、果胶及黄酮类物质含量居各种鲜果之首<sup>[2]</sup>。据研究报道,山楂有消食、化积、健胃等药用价值和具有较高的抗氧化性<sup>[3]</sup>。泥鳅是人们常食和方便食用的鱼类,含有多种生物活性物质,如糖蛋白、凝集素、抗菌肽、不饱和多烯脂肪酸、牛磺酸和赖氨酸等必需氨基酸以及锌硒等微量营养元素<sup>[4,5]</sup>。有实验证明复方泥鳅超微粉胶囊(由冻干泥鳅、枸杞子、太子参、黄精、百合、桑葚共 6 种原料组成)具有显著的抗疲劳功效<sup>[6]</sup>。研究资料表明,不同负荷运动对心肌 MHC 和 TM1 蛋白表达造成影响<sup>[7]</sup>,而中药和食物干预下的变化少有研究报道。根据中医“药食同源”理论,本实验选取韭菜子、山楂和泥鳅配制成韭菜泥鳅汤干预小鼠游泳训练,观察小鼠力竭运动能力和心肌 MHC 和 TM1 基因表达变化,对中医药食功能性食品抗疲劳及提高运动能力作用和机制进行探索。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验动物与分组

健康雄性 ICR 小鼠,体重  $20 \pm 2$  g,购自湖南斯耐克景达实验动物有限公司,许可证号 SCXK(湘)2011-0003。以国家标准啮齿类动物饲料分笼饲养,自由饮食饮水。室温控制在  $22 \pm 2$  °C,相对湿度 40 % - 55 %,每天光照 12 h。小鼠静养与观察三日,按体重分层随机分为安静对照组(C)、运动训练组(T)、泥鳅运动组 1(N1)、泥鳅运动组 2(N2),每组 8 只。

### 1.2 韭菜泥鳅汤制备

韭菜子与山楂等量,加 6 倍自来水浸泡一晚,旺火加热至沸腾后文火煎煮 40 min,滤出煎液后残渣再加入 4 倍量自来水文火煎煮 40 min 滤出煎液。将 2 次煎液过滤去渣合并,放入 4 °C 冰箱备用。韭菜子、山楂、泥鳅肉末按 1:1:5 重量比,用烧杯煎煮并在碾钵内碾成均匀汁液,浓度为 0.5 g/ml,供 N1 组直接灌胃。按纯净水与泥鳅汁液 3:2(V/V)配成 0.2 g/ml 的浓度,用于 N2 组灌胃。

### 1.3 游泳训练与力竭

将 T 和 N 组小鼠放入深 80 cm、直径 55 cm 桶内游泳,水温  $30 \pm 2$  °C、水深 40 cm,计时并注意观察状

态。每周五天,下午进行,共进行三周。第一周不负重 30 min,第二周尾根部 2 % 负重 40 min,第三周 3 % 负重 40 min。第二和三周每日上午,C 组和 T 组生理盐水灌胃,N1 和 N2 组灌韭菜泥鳅汤,按 0.3 ml/只灌胃。训练结束休息 2 d,T 组和 N 组在尾根部负重 5 % 进行力竭游泳,记录游泳至力竭时间。力竭判断标准:小鼠沉入水中超过 10 s,且放在平时时呼吸深、急,神情疲倦,垂头俯卧,刺激后无反应,无法完成翻正反射。

### 1.4 取材

T 组和 N1 组小鼠力竭游泳 24 h 后,与 C 组均称取体重和麻醉,在冰上打开胸腔,迅速摘取心脏,放入预冷的生理盐水中清洗,滤纸小心吸干水分,称取心脏质量。用小剪刀剪取心尖,置液氮中速冻, - 80 °C 保存备用。从心尖上方左心室切取  $3 \times 3 \times 3$  mm 心肌组织置入 4 °C 的 4 % 多聚甲醛中,固定 1 周后进行常规组织脱水、透明、包埋、石蜡切片,片厚 5  $\mu$ m。

### 1.5 检测指标及方法

1) 心系数 以小鼠心脏质量与体质量的比值计算心脏的脏器系数(mg/g)。

2) 心肌组织 HE 染色 心肌组织切片在常规脱蜡水化后进行 HE 染色,胞核染成蓝色,胞质染成红色,光镜下观察组织细胞的结构。使用 LEICADM IJBZ 型双目显微镜(德国 LEICA 公司)和 MoticB 显微摄像系统(麦克奥迪实业集团公司),由湖南中医药大学病理室完成。

3) Real-time PCR MHC 和 TM1 基因表达的检测由湖南师范大学生命科学院分子生物学实验室完成。

引物合成: $\alpha$ -MHC 基因引物序列:For:ACGGTGACCATAAAGGAGGA; Rev: TGTCCTCGATCTTGTCGAAC。 $\beta$ -MHC 基因引物序列:For:ATGTGCCG-GACCTTGGAAG; Rev: CCTCGGGTTAGCTGAGAGATCA。TM1 基因引物序列:FOR: TGACGAACAACCTT-GAAGTCACTG; Rev: CAGGGCCAGCTTTAGCTCGTTA。

总 RNA 的提取:按照 trizol reagen(美国 Invitrogen 产品)试剂说明书进行。将 0.1 g 组织加到 1 ml TRIzol 中,用组织匀浆机匀浆,吹打混匀后在室温培养 10 min,加入 0.25 ml 氯仿涡旋振荡 15 s,在室温静置 5 min。4 °C、12000 g,离心 15 min 至分层,吸取上层水相加入等体积 100 % 异丙醇轻轻混匀。 - 20 °C 放 2 h 或过夜,4 °C、12000 g,离心 10 min 形成凝胶状 RNA 沉淀。吸掉上清后加入 1 ml 的 75 % 乙醇,4 °C、7500 g,离心 5 min,吸掉上清后在空气中放 5 ~

15 min 干燥沉淀,加入 30 ul 无 RNase 水,用枪头混匀沉淀。测定 RNA 浓度并调整为 0.4 ug/ul,每个取 3 ul 上样跑胶(1.5 %的 DNA 胶),观察 RNA 完整性。

mRNA 逆转录:在编号 1-6 的 1.5 ml EP 管中加入下列组份试剂(消化基因组 DNA):RNA(1 ug) 2.5 ul,10 × buffer with MgCl 1ul, DNaseI(fermentas) 1ul, Nuclease-free water 5.5 ul,合计 10 ul。37 °C 下,30 min 后加入 25 mM 的 EDTA 1ul,65 °C,10 min 终止反应。在上述反应体系中,加反应试剂 RNA(1 ug) 11 ul,Primer oligo(dT) 1 ul。再按下加入试剂 5 × reaction buffer 4 ul,Ribolock RNase Inhibitor(20 U/ul) 1 ul,10 × dNTP Mix(10 mM each) 2 ul 和 RevertAid M-MuLV Reverse Transcriptase (200 u/ul) 1 ul。42 °C 反应 60 min,70 °C 热处理 5 min,加水稀释至 100 ul。

Real time PCR:仪器为 ABI 7900HT;试剂:SYBR © Premix Ex Taq™(Takara);体系:

SYBR © Premix Ex Taq(2 ×) 15 μl,PCR Forward Primer(10μM) 1.0 μl,PCR Reverse Primer(10μM) 1.0 μl,ROX 0.6 μl,Template 5 μl,ddH2O 为 7.4 μl,总体系 30 ul,分三重复孔,每孔 10 ul。程序:95° C30sec,95° C5sec,60° C30sec,40 个循环。

## 1.6 统计学方法

实验数据以平均数 ± 标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,采用 SPSS 19 统计软件进行分析,样本均数的比较采用 One-Way ANOVA 分析,方差齐用 LSD、方差不齐采用 Dennett's T3 法分析比较。显著性水平取  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 小鼠力竭运动时间

N1 组小鼠的游泳至力竭的时间为  $129.57 \pm 36.23$  min,显著地长于 T 组的  $55.86 \pm 20.23$  min,时间延长 131.95 % ( $P < 0.05$ )。N2 组为  $89.57 \pm 20.23$  min,呈长于 T 组趋势但不具有统计学意义 ( $P > 0.05$ ),未对 N2 组进行后续取材观察与检测。

### 2.2 小鼠心系数

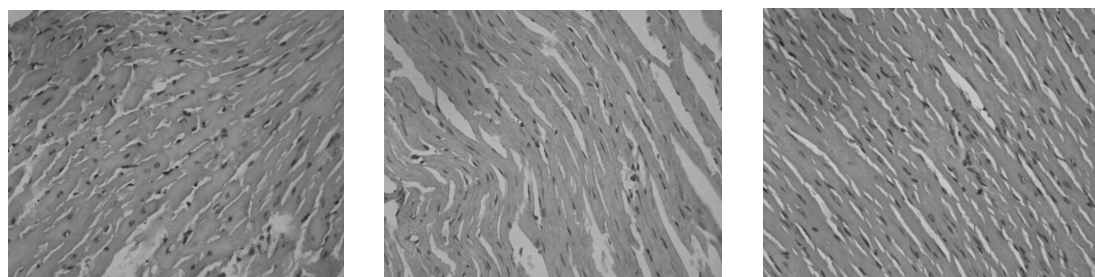
与 C 组小鼠心系数  $3.62 \pm 0.36$  比较,T 组小鼠的心系数  $4.99 \pm 0.67$  显著增高 ( $P < 0.05$ ),N1 组心系数  $4.21 \pm 0.50$  有增高趋势,但无显著统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

### 2.3 小鼠心肌组织 HE 染色结果

图 1 示,C 组心肌细胞界限清晰,结构正常。力竭后 24h,T 组的心肌细胞界限模糊,可见心肌纤维断裂和间质水肿;N1 组的心肌细胞界限清晰,排列整齐,无心肌纤维断裂,也无明显的间质水肿。

### 2.4 小鼠心肌 MHC mRNA 及 TM1 mRNA 的表达

表 1、图 2 示,与 C 组比较,T 组的  $\alpha$ -MHC mRNA 和 TM1 mRNA 表达无显著性差异 ( $P > 0.05$ ),而  $\beta$ -MHC mRNA 表达显著增高 ( $P < 0.05$ ), $\alpha/\beta$ -MHC mRNA 显著降低 ( $P < 0.05$ );N1 组的  $\alpha$ -MHC mRNA、 $\beta$ -MHC mRNA 和 TM1 mRNA 表达较 C 组和 T 组均显著增高 ( $P < 0.05$ ),但  $\alpha/\beta$ -MHC mRNA 却无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。



安静对照组 (C)

运动训练组 (T)

泥鳅运动组 1 (N1)

图 1 各组小鼠心肌形态学变化(苏木精-伊红染色,×200)

## 3 讨论

### 3.1 韭菹泥鳅汤对小鼠运动能力的影响

“运动性疲劳”是机体生理过程不能维持其机能

在特定水平上和(或)不能维持预定的运动强度,导致机体运动能力暂时性下降<sup>[8]</sup>。中医认为这与机体出现阴精和阳气不足,缺乏维持正常运转的物质和动力有关,补肾益精壮阳能抵抗疲劳达到提高运动能力的效果<sup>[1]</sup>。本实验选取韭菜子温肾助阳固精,山楂

健胃消食和泥鳅补中气、滋阴壮阳、强精壮体,配制成补肾益精壮阳的韭楂泥鳅汤干预小鼠力竭游泳运动探讨其对小鼠运动能力的影响。实验结果证实合理

应用能使训练小鼠游泳至力竭的时间比单纯运动训练小鼠延长,对补益机体、抵抗疲劳、提高运动能力有良好作用。

表 1 各组小鼠心肌 α-MHC mRNA、β-MHC mRNA、α/β-MHC mRNA 和 TM1 mRNA 表达(RQ 值, $\bar{X} \pm S$ )

组别	n	α - MHC mRNA	β - MHC mRNA	α/β - MHC mRNA	TM1 mRNA
C 组	8	1.64 ± 0.84	1.00 ± 0.17	1.74 ± 1.08	1.36 ± 0.32
T 组	8	1.33 ± 0.49	2.28 ± 0.51 *	0.60 ± 0.23 *	1.69 ± 0.13
N1 组	8	6.20 ± 3.74 * &	4.05 ± 0.71 * &	1.49 ± 0.29	4.42 ± 0.5 * &

\* 与 C 组比较,  $P < 0.05$ ; & 与 T 组比较,  $P < 0.05$ 。

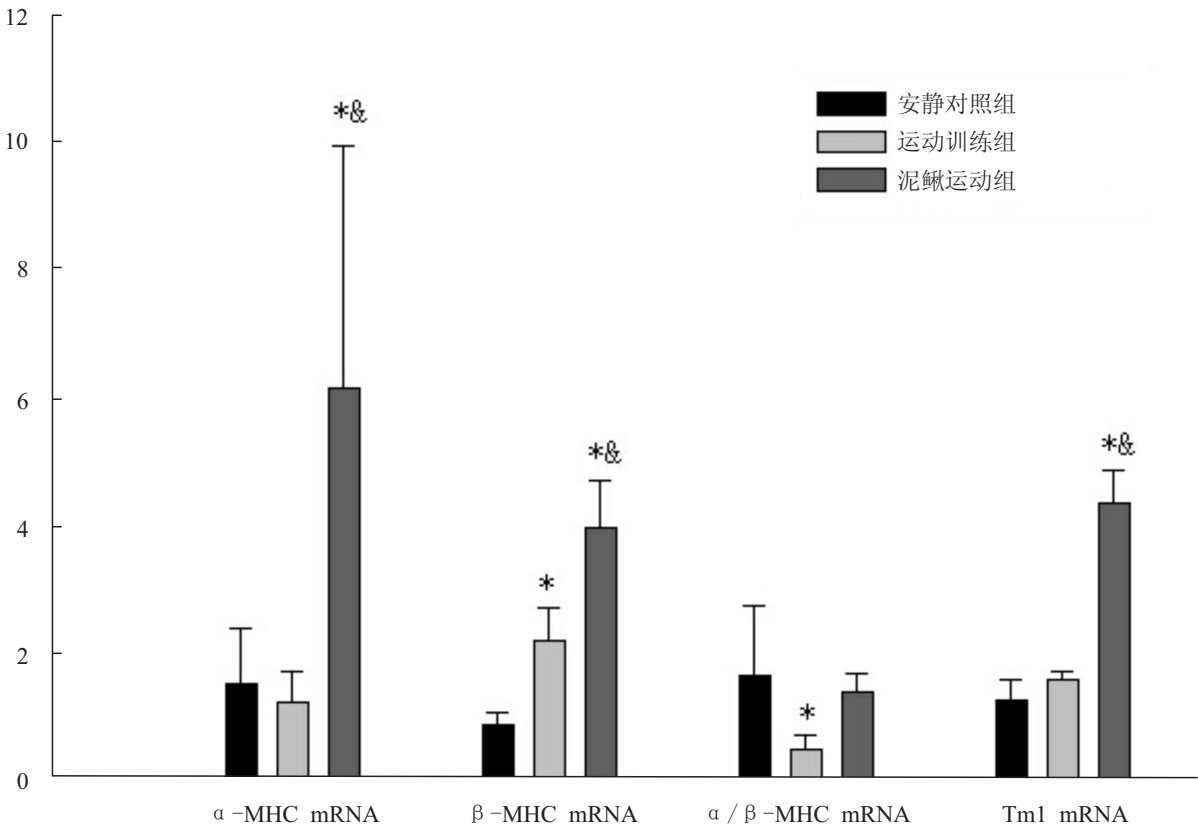


图 2 小鼠心肌组织 MHC mRNA 及 TM1 mRNA 差异表达的柱状图

3.2 韭楂泥鳅汤对训练力竭小鼠心肌形态学影响

生理性心肌肥大与病理性心肌肥大均可表现为心系数的增加<sup>[9]</sup>,单纯将心系数指标作为心脏功能提高的标志会混淆两种不同性质的心肌肥大,耐力运动后的心系数应与形态学以及心脏标志物等指标结合起来共同分析鉴别<sup>[10]</sup>。本实验将心系数指标与 HE 染色观察相结合显示,单纯运动训练并力竭游泳小鼠的心系数明显增高,心肌细胞界限模糊,心肌纤维断裂和间质水肿,细胞形态改变,可见心肌组织和

细胞有一定程度的结构损伤。众所周知,力竭运动造成心肌损伤,由于心脏是血液循环的动力器官,能量消耗大,心肌几乎完全依靠有氧代谢提供能量,对缺血缺氧十分敏感<sup>[11]</sup>。有学者认为心肌损伤有可能导致心肌线粒体数量减少和某些心肌收缩蛋白质出现降解<sup>[12]</sup>,心肌的收缩能力及运动能力势必受到影响。而应用韭楂泥鳅汤干预的小鼠心系数呈增高趋势,力竭运动后心肌细胞光镜下纤维结构清晰,着色均匀,细胞界限清楚,细胞核染色清晰,显然力竭运动对心



脏造成的损害减轻。反映合适浓度的韭楂泥鳅汤干预,可使小鼠在运动过程中保持良好的心肌供血供氧,机体对运动训练适应良好。其心系数适度增高是心脏形态结构优化、训练小鼠运动耐力提高、运动能力上升的结构基础。

### 3.3 各组小鼠心肌组织 MHC 基因表达

心肌肌球蛋白重链(myosin heavy chain, MHC)基因编码的重型肌球蛋白有  $\alpha$ -MHC( $\alpha$ -myosin heavy chain)和  $\beta$ -MHC( $\beta$ -myosin heavy chain),研究表明  $\alpha$ -MHC/ $\beta$ -MHC 是决定心脏收缩速度和收缩力的关键因素<sup>[13]</sup>。 $\alpha$ -MHC mRNA 表达和  $\alpha/\beta$ -MHC mRNA 值显著性上调,可能通过调节重型肌球蛋白提高心肌收缩力<sup>[14]</sup>。 $\alpha$ -MHC 是具有 ATP 酶活性的重要结构蛋白和收缩蛋白,心肌  $\alpha$ -MHC 是心肌重塑过程中的重要标志蛋白质<sup>[15]</sup>,运动引起心肌肥大的发生时心肌细胞  $\alpha$ -MHC 增加,而  $\beta$ -MHC 减少<sup>[16]</sup>。在力竭运动和递增负荷大强度运动后, $\alpha$ -MHC 表达下调,预示着心肌收缩能力下降,这可能是大鼠心肌组织在力竭运动及大强度运动刺激下发生缺血性损伤所致<sup>[17]</sup>。李晓东等的实验表明心肌缺血缺氧条件下, $\beta$ -MHC 的表达可增加<sup>[18]</sup>。本实验中单纯训练并力竭游泳小鼠的心肌组织中  $\alpha$ -MHC mRNA 下调、 $\beta$ -MHC mRNA 表达上升和  $\alpha/\beta$ -MHC mRNA 值降低,可能导致  $\alpha$ -MHC 蛋白降低,影响心肌收缩能力。结合其心系数增加和 HE 染色结果,说明心肌确实存在一定损害,有可能发生了心肌缺血损伤后病理性肥大。而合适浓度的韭楂泥鳅汤干预,小鼠心肌  $\alpha$ -MHC mRNA 表达明显升高, $\alpha/\beta$ -MHC mRNA 接近正常,说明超负荷运动后机体心脏在基因水平上也发生适应运动负荷的良性变化,有利于迅速恢复强健的心肌收缩能力。结合其适度增高的心系数和 HE 染色光镜下的结果,说明韭楂泥鳅汤干预小鼠的心肌重塑呈良性。

### 3.4 各组小鼠心肌组织 TM1 基因表达

原肌球蛋白(tropomyosin, TM)是肌肉收缩过程中重要的调节蛋白质<sup>[19]</sup>。原肌球蛋白 1(Tropomyosin-1, TM1)是 TM 家族中相对分子质量高,对肌肉收缩过程具有重要调节作用的成员,其最重要的特性是能与肌动蛋白肌丝相结合,在细胞移动、形态发生和胞浆移动中调节肌动蛋白丝的动态变化,使肌动蛋白稳定于聚合状态<sup>[20]</sup>。目前,对 TM1 的研究多见于临床,在运动医学领域史绍蓉报道其与肌球蛋白重链对运动应激的敏感性高,并与运动负荷密切相关,力

竭运动和递增负荷大强度运动对心肌收缩功能负面影响,中等强度运动未产生不良影响或起促进作用<sup>[21]</sup>。本实验结果显示,单纯训练并力竭游泳小鼠心肌的 TM1 mRNA 表达有上升趋势,说明适度的运动训练可以通过基因表达改善,促进心肌收缩调节蛋白形成,提高心肌收缩能力以适应运动负荷,并在一定程度上对抗力竭运动造成的负面影响。但应用韭楂泥鳅汤干预,小鼠心肌 TM1 mRNA 表达明显高于安静组与单纯训练并力竭游泳组,有可能 TM1 的调节作用更充分,从而心肌收缩能力增强,功能状态更佳。说明此汤通过基因表达变化而影响心肌收缩蛋白和收缩调节蛋白形成,是提高小鼠运动能力的重要分子生物学机制。

## 4 结论

韭楂泥鳅汤能抵抗运动疲劳,延长游泳训练小鼠的力竭运动时间,其作用机制与有效优化训练小鼠心脏形态结构、稳定肌球蛋白重链基因表达比和增强对肌肉收缩过程中具有重要调节作用的原肌球蛋白 1 的基因表达相关。

## 参考文献

- [1] 何娟,李上球,刘戈,等. 韭菜子醇提物对去势小鼠性功能障碍的改善作用[J]. 江西中医学院学报,2007,19(2):68-70.
- [2] 刘荣华,邵峰,邓雅琼,等. 山楂化学成分研究进展[J]. 中药材,2008,31(7):1100-1103.
- [3] 吴士杰,李秋津,肖学风,等. 山楂化学成分及药理作用的研究[J]. 药物评价研究,2010,33(4):316-319.
- [4] 钦传光,陈泽宪,周军,等. 泥鳅与其提取物中微量元素的分析[J]. 微量元素与健康研究,2001,18(1):49-50.
- [5] PARK C B, LEE J H, PARK I Y, et al. A novel antimicrobial peptide from the loach, *misgurnus anguillicaudatus* [J]. FEBS Lett, 1997, 411(2):173-178.
- [6] 张家国,孙静,潘洪民. 复方泥鳅超微粉胶囊抗疲劳的动物性实验研究[J]. 食品研究与开发,2012,33(9):174-177.
- [7] PERRINO C, GARGIULO G, PIRONTI G, et al. Cardiovascular effects of treadmill exercise in physiological and pathological preclinical settings[J]. Am J physiol heart circ physiol, 2011, 300: H1983-H1989.
- [8] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第十四卷)[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [9] DORN GW2nd. The fuzzy logic of physiological cardiac hypertrophy[J]. Hypertension, 2007, 49(5):962-970.

- [10] STEVE MH, CHIA-Y, K RZYSZTOF JC, et al. Simultaneous quantification of human cardiac  $\alpha$ - and  $\beta$ - myosin heavy chain proteins by MALDI-TOF mass spectrometry[J]. Anal Chem, 2004, 76(6):1683-1689.
- [11] 宋娜玲, 赵启仁, 刘家慧. 心肌肌球蛋白及其重链的研制、特性鉴定和应用[J]. 中国辐射卫生, 2007, 16(2):129-134.
- [12] SOCI U P R, FERNANDES T, HASHIMOTO N Y, et al. MicroRNAs 29 are involved in the improvement of ventricular compliance promoted by aerobic exercise training in rats[J]. Physiol Genomics, 2011, 43(11):665-673.
- [13] WANG J, GUO X, DHALLA N S. Modification of myosin protein and gene expression in failing hearts due to myocardial infarction by enalapril or losartan[J]. Biochemistry Biophys Acta, 2004, 1690(2):177-184.
- [14] 张丽娜, 张天良, 金国琴. 巴戟天对 D-半乳糖致衰老大鼠心肌细胞肌球蛋白和肌动蛋白基因表达的影响[J]. 中国老年学杂志, 2011, 31(24):4836-4838.
- [15] G AYA AM, A SHFORD RF. Cardiac complications of radiation therapy[J]. Clin Oncol (R Coll Radiol), 2005, 17(3):153-159.
- [16] SHAVE R, ROSS P, LOW D, et al. Cardiac troponin I is released following high-intensity short-duration exercise in healthy humans[J]. International Journal of Cardiology, 2009, 145(2):337-339.
- [17] MANUEL R, CKENBERG R S, SCHLUTER K L. Adverse cardiac remodelling in spontaneously hypertensive rats: acceleration by high aerobic exercise intensity[J]. J Physiol, 2012, 590(21):5389-5400.
- [18] 李晓东, 黄跃生, 张家平. 机械牵张对缺血缺氧心肌细胞肌球蛋白重链 mRNA 表达的影响[J]. 中华烧伤杂志, 2004, 20(3):138-141.
- [19] GOETTE A, BUKOWSKA A, DOBREV D, et al. Acute atrial tachyarrhythmia induces angiotensin II type 1 receptor-mediated oxidative stress and microvascular flow abnormalities in the ventricles[J]. Eur Heart J, 2009, 30:1411-1420.
- [20] 叶丽虹, 秦宵然, 张晓东, 等. 原肌球蛋白、波形纤维蛋白和热休克蛋白 70 在肝癌转移亚细胞中表达上调[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2005, 21(2):244-249.
- [21] 史绍蓉, 王娟.  $\alpha$ -心肌肌球蛋白重链与原肌球蛋白-1 在不同负荷运动中的差异表达研究[J]. 北京体育大学学报, 2009, 32(10):51-54.

[责任编辑 魏 宁]